两电平电压型逆变器共模电压抑制策略

杨　浩　吕雪峰　潘浩明

（国网安徽省电力有限公司检修分公司　合肥　230061）



杨　浩　男 1992年生，助理工程师，主要从事变电站运行维护方面的工作。



吕雪峰　男 1989年生，工程师，主要从事变电站运行维护方面的工作。

摘要：主要介绍了几种抑制逆变器共模电压（CMV）的方法，其中一类是基于空间矢量调制策略优化的方案，主要包括零矢量替代（AZSPWM）、最近非零矢量合成（NSPWM）、虚拟空间矢量调制（VSVM）等策略；另一类是改变硬件电路的拓扑结构抑制共模电压，主要是通过利用三相四桥臂拓扑结构完成对共模电压的抑制。对上述两类方法进行相关的仿真与分析，为共模电压抑制方案的研究提供参考。

关键词：逆变器　空间矢量调制　共模电压

中图分类号：TM464

Research on Common Mode Voltage Suppression Strategy for Two-Level Voltage Inverter

Yang Hao　Lv Xuefeng　Pan Haoming

(State Grid Anhui Electric Power Co.,Ltd. Maintenance Branch　Hefei　230061　China)

Abstract: In this paper, several methods are introduced, which are mainly divided into two categories of programs, to suppress the common mode voltage (CMV) of inverter. One kind is based on space vector modulation strategy optimization, mainly including the active zero state PWM (AZSPWM), near state PWM (NSPWM), virtual space vector modulation (VSVM) and so on. The other is to change the topology of the hardware circuit to suppress the common mode voltage, which mainly used the three-phase four-leg topology to complete the common mode voltage suppression. In this paper, the simulation and analysis of the above schemes are carried out.

Keywords: Inverter, space vector modulation, common mode voltage

1 引言

随着变频器的广泛应用，一些负面效应也随之凸显出来，尤其是变频器产生的高频共模电压，会在电动机转轴上感应出高幅值轴电压，并形成轴承电流，加速电动机轴承老化，使电动机轴承在短期内损坏，降低了电动机的使用寿命 [1]。共模电压还会在激励系统中的杂散电容和寄生耦合电容中产生较大的共模漏电流。该漏电流通过定子绕组和机壳间的静电耦合流入大地，并经接地导体返回电网。这不仅会引起保护装置误动作，还会产生较大共模电磁干扰，严重影响其他控制系统或者电子设备的正常运行 [2]。

近年来，国内外诸多学者在共模电压抑制方面开展了大量的研究，这些研究主要分为两个方面：一是通过优化调制策略，在软件算法层面完成共模电压的抑制。随着数字处理器性能的飞速提升，逆变器调制策略优化主要是基于空间矢量调制（Space Vector Modulation，SVM）方案，由此衍生出以下几种主要调制策略：零矢量替代（Active Zero State PWM，AZSPWM）、最近非零矢量合成（Near State PWM，NSPWM）、虚拟空间矢量调制（Virtual Space Vector Modulation，VSVM）等；另一方面是通过改变逆变器的硬件电路结构或外围完成对共模电压的抑制。该方案主要是通过增加一个滤波器对产生的共模电压进行滤除 [3]，后续有相关研究对此进行了升级，通过增加第四个桥臂构造三相四桥臂拓扑结构对共模电压进行抑制。本文对各方案的基本原理进行了简单分析，并在此基础上进行了一些仿真验证。

2 传统两电平逆变器共模电压

传统两电平逆变器电路拓扑结构如图 1 所示。

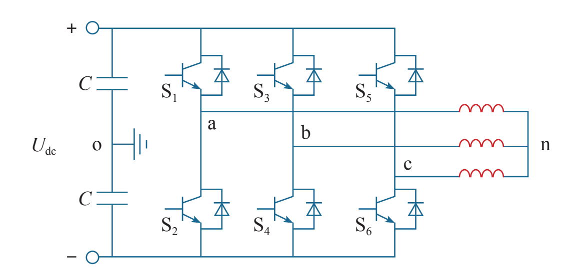


图 1 传统两电平逆变器拓扑结构

Fig.1 Topology of conventional two-level voltage source inverter

共模电压定义为逆变器输出中性点对地的参考电压，即 U_{no}[4]，根据逆变器拓扑结构可得

$$\begin{cases} U_{no} = U_{n1} + U_{1o} \\ U_{no} = U_{n2} + U_{2o} \\ U_{no} = U_{n3} + U_{3o} \end{cases} \tag{1}$$

又因为 $U_{n1} + U_{n2} + U_{n3} = 0$，结合式（1）可得

$$U_{no} = \frac{U_{1o} + U_{2o} + U_{3o}}{3} \tag{2}$$

假设逆变器直流侧母线电压为 U_{dc}，当使用传统 SVPWM 矢量调制方案进行控制时，电压空间矢量分布如图 2 所示。

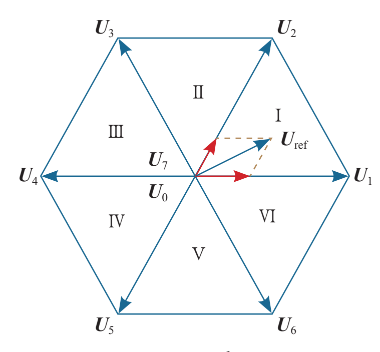


图 2 SVPWM 空间矢量图

Fig.2 Space vectors of SVPWM

不同电压空间矢量作用时的共模电压分布见下表。

表 不同开关状态共模电压比较

Tab. CMV of different switching states

矢量	S_1、S_3、S_5 状态	共模电压 U_{no}
$\boldsymbol{U}_0$	000	$-U_{dc}/2$
$\boldsymbol{U}_1$	100	$-U_{dc}/6$
$\boldsymbol{U}_2$	110	$U_{dc}/6$
$\boldsymbol{U}_3$	010	$-U_{dc}/6$
$\boldsymbol{U}_4$	011	$U_{dc}/6$
$\boldsymbol{U}_5$	001	$-U_{dc}/6$
$\boldsymbol{U}_6$	101	$U_{dc}/6$
$\boldsymbol{U}_7$	111	$U_{dc}/2$

当参考电压矢量 $\boldsymbol{U}_{ref}$ 在第一扇区时，基于传统 SVPWM 矢量合成方案，参与合成的矢量为 $\boldsymbol{U}_0(000)$、$\boldsymbol{U}_1(100)$、$\boldsymbol{U}_2(110)$ 和 $\boldsymbol{U}_7(111)$，开关时序以及共模电压分布如图 3 所示。

从图 3 可以看出，采用传统 SVPWM 调制策略控制逆变器时产生的共模电压峰值为 $U_{dc}/2$，但是在电压矢量选择时可以避开零矢量，控制共模电压峰值减小到 $U_{dc}/6$，由此衍生出不同的基于 SVM 的优化调制策略。

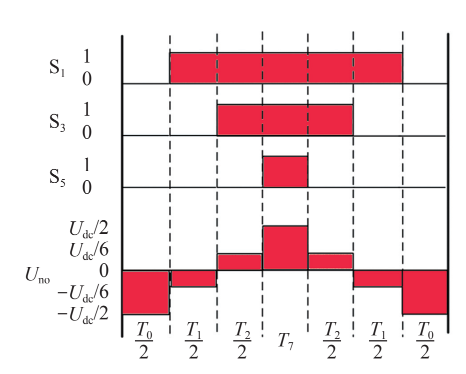


图 3　SVPWM 第一扇区矢量作用时序图

Fig.3　Switching pattern of SVPWM in sector Ⅰ

3　基于 SVM 调制策略的优化

3.1　零矢量替代调制策略（AZSPWM）

AZSPWM 的基本原理是采用两个相反的非零电压矢量来代替零电压矢量，空间矢量分布图 4 所示。

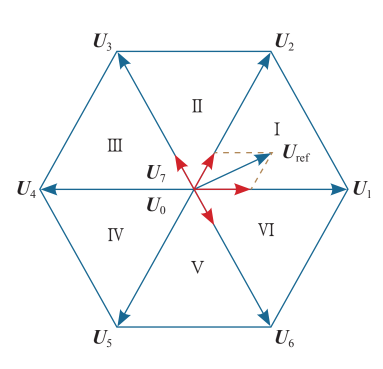


图 4　AZSPWM 空间矢量图

Fig.4　Space vectors of AZSPWM

当参考电压矢量 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{ref}}$ 在第一扇区时，基于 AZSPWM 矢量合成方案，参与合成的矢量为 $\boldsymbol{U}_6$(101)、$\boldsymbol{U}_1$(100)、$\boldsymbol{U}_6$(110) 和 $\boldsymbol{U}_3$(010)，开关时序以及共模电压分布如图 5 所示。

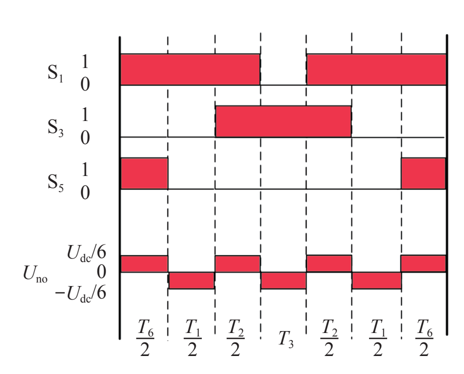


图 5　AZSPWM 第一扇区矢量作用时序图

Fig.5　Switching pattern of AZSPWM in sector Ⅰ

从图 5 可以看出，当采用 AZSPWM 调制策略控制逆变器时，共模电压峰值很好地被控制在了 $U_{\mathrm{dc}}/6$，仅为传统 SVPWM 控制策略的 1/3。

3.2　附近非零矢量合成调制策略（NSPWM）[5]

NSPWM 的基本原理是使用与参考矢量距离最近的 3 个非零矢量对其进行合成，空间矢量分布图如图 6 所示。

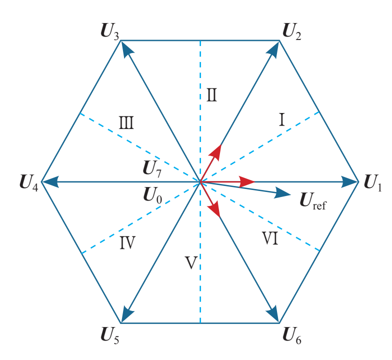


图 6　NSPWM 空间矢量图

Fig.6　Space vectors of NSPWM

当参考电压矢量 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{ref}}$ 在第一扇区时，基于 NSPWM 矢量合成方案，参与合成的矢量为 $\boldsymbol{U}_6$(101)、$\boldsymbol{U}_1$(100)、$\boldsymbol{U}_2$(110)，开关时序以及共模电压分布如图 7 所示。

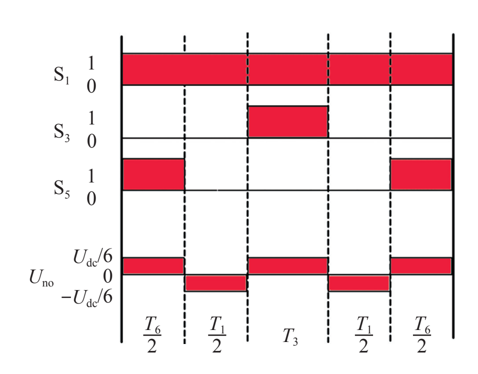


图 7　NSPWM 第一扇区矢量作用时序图

Fi.7　Switching pattern of NSPWM in sector Ⅰ

该方案和 AZSPWM 一样，可以将共模电压的峰值减小到 $U_{\mathrm{dc}}/6$，并且在一个 T_s 周期内，共模电压极性只翻转了 4 次，少于 AZSPWM 的 6 次，谐波分量自然较少 [6]。

3.3　虚拟空间矢量调制策略（VSVM）[7]

VSVM 的基本原理是利用合成的虚拟空间矢量来合成参考电压矢量，合成的虚拟空间矢量的共模电压为零，空间矢量分布如图 8 所示。其中，参考矢量 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{ref}}$ 通过虚拟空间矢量 $\boldsymbol{U}_{61}$ 和 $\boldsymbol{U}_{12}$ 以及两个真实矢量 $\boldsymbol{U}_6$ 和 $\boldsymbol{U}_3$ 作用合成，虚拟空间矢量 $\boldsymbol{U}_{61}$ 和 $\boldsymbol{U}_{12}$ 对应的共模电压为零，但这个零值是平均值。开关时序以及共模电压分布如图 9 所示。

从图 9 可以看出，VSVM 方案同样可以将共模

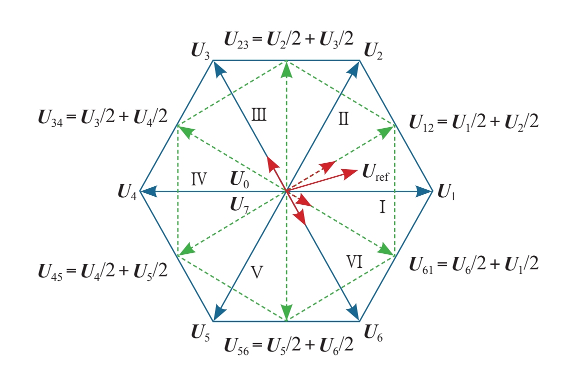


图 8　VSVM 空间矢量图

Fig.8　Space vectors of VSVM

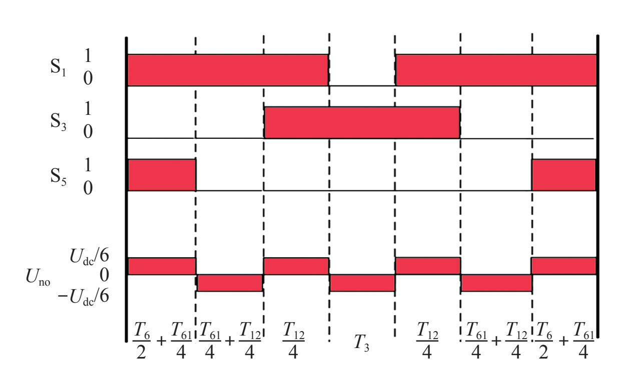


图 9　VSVM 第一扇区矢量作用时序图

Fig.9　Switching pattern of VSVM in sector Ⅰ

电压的峰值抑制为 $U_{dc}/6$，且使得一个 T_s 周期内的共模电压的平均值为零、一个周期内共模电压均值为零，较好地抑制了共模电压中 3 次以及 3 的整数倍次谐波分量。

3.4　基于三相四桥臂的共模电压抑制

三相四桥臂逆变器拓扑电路如图 10 所示。

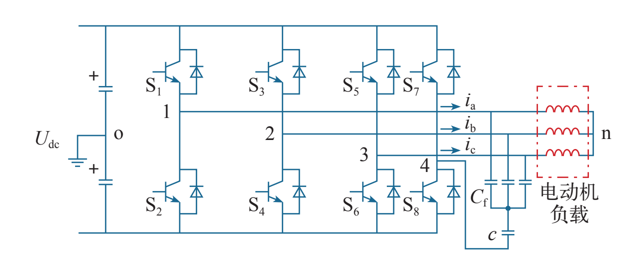


图 10　三相四桥臂逆变器拓扑结构

Fig.10　Topology of three-phase four-leg inverter

分析原理与传统三桥臂拓扑类似，由此可得三相四桥臂逆变器共模电压表达式为

$$U_{no}=(U_{1o}+U_{2o}+U_{3o}+U_{4o})/4 \tag{3}$$

式（3）中分子上的变量为偶数个，由此可以通过调节不同的导通状态使共模电压值抑制为零，如当前 3 个桥臂状态为（100）时，共模电压为 $-U_{dc}/6$，此时可以通过控制第四个桥臂的导通状态对此共模电压进行补偿，使 U_{no} 的值为零，通过对 4 个桥臂的逻辑状态列举，可以得到第 4 个桥臂的控制信号为 $S_D=S_A\oplus S_B\oplus S_C$（前 3 个桥臂的控制也是基于非零矢量的调制），从而通过添加第 4 个桥臂可以将共模电压瞬时值理论上抑制为零。

4　Simulink 仿真验证

仿真中开关频率为 1kHz，调制度为 0.8。

4.1　SVPWM 调制策略

仿真结果如图 11、图 12 所示。

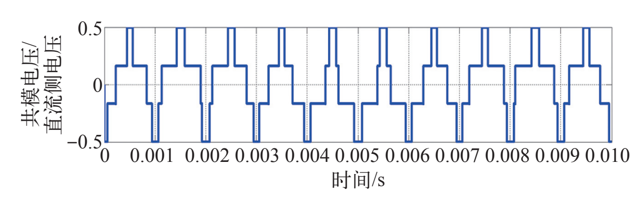


图 11　SVPWM 共模电压仿真

Fig.11　Simulation results of SVPWM common mode voltage

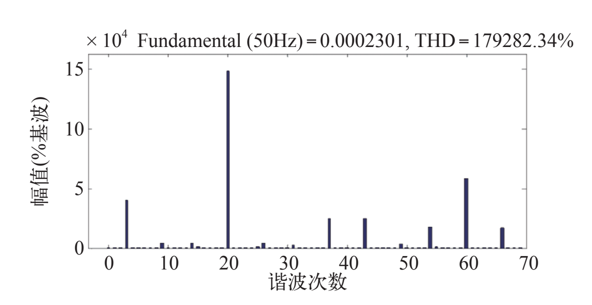


图 12　SVPWM 共模电压谐波分析

Fig.12　FFT for SVPWM common mode voltage

4.2　AZSPWM 调制策略

仿真结果如图 13、图 14 所示。

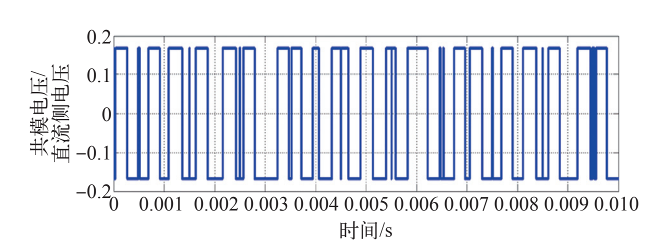


图 13　AZSPWM 共模电压仿真

Fig.13　Simulation results of AZSPWM common mode voltage

4.3　NSPWM 调制策略

仿真结果如图 15、图 16 所示。

4.4　VSVM 调制策略

仿真结果如图 17、图 18 所示。

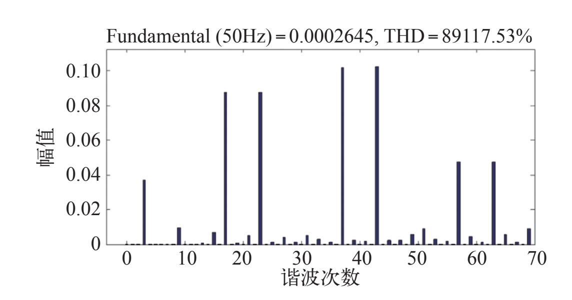


图 14 AZSPWM 共模电压谐波分析

Fig.14 FFT for AZSPWM common mode voltage

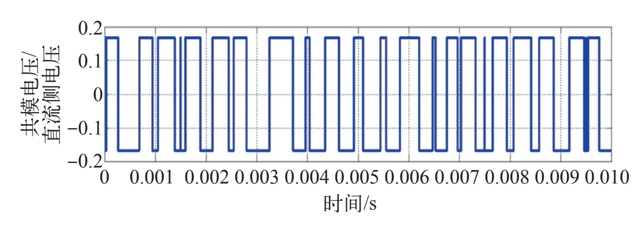


图 15 NSPWM 共模电压仿真

Fig.15 Simulation results of NSPWM commonvmode voltage

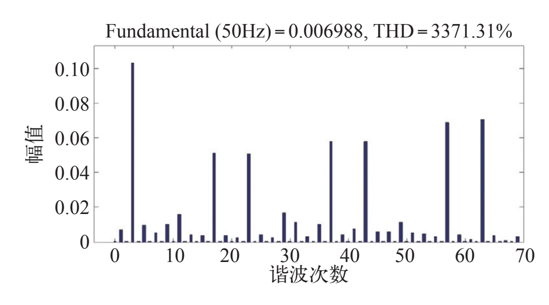


图 16 NSPWM 共模电压谐波分析

Fig.16 FFT for NSPWM common mode voltage

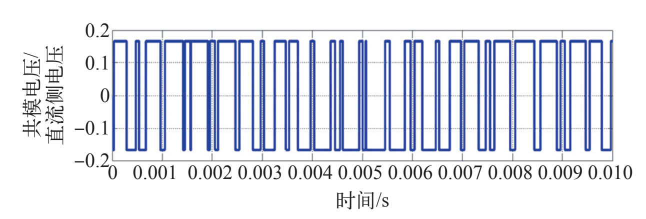


图 17 VSVM 共模电压仿真

Fig.17 Simulation results of VSVM common mode voltage

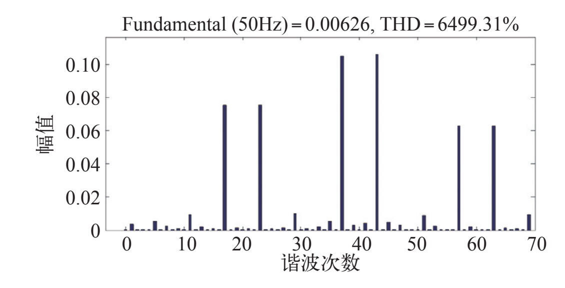


图 18 VSVM 共模电压谐波分析

Fig.18 FFT for VSVM common mode voltage

4.5 三相四桥臂控制策略

仿真结果如图 19 所示。

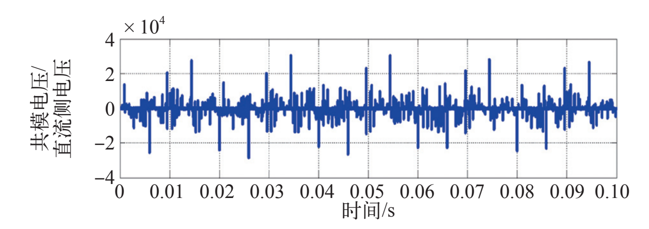


图 19 三相四桥臂共模电压仿真

Fig.19 Simulation results of common mode voltage for three-phase four-leg inverter

5 结论

由上述仿真结果可以发现，AZSPWM、NSPWM 这两种方案可以很好地将共模电压的峰值抑制到直流侧电压的 1/6，但是共模电压中的 3 次谐波成分依然存在；由 VSVM 的仿真波形可以发现，共模电压中的 3 次及 3 的整数倍次谐波成分得到了很好的抑制，但是共模电压峰值依然为直流侧电压值的 1/6；最后，将选择非零矢量调制方案与三相四桥臂逆变器拓扑结构相结合，由波形可以看出，共模电压被抑制得几乎为零，因此这种方案的共模抑制效果最好。

相较 AZSPWM、NSPWM、VSVM 三个方案，采用三相四桥臂拓扑结构会增加硬件的成本，并且三相四桥臂结构提出的初衷是针对负载端带三相不对称负载 [8]，本文中的三相四桥臂控制方案对于 16 个空间电压矢量仅使用了其中的 6 个，且不能带三相不对称负载，这也使得该拓扑的潜力并未完全发挥。

本文通过理论分析与仿真验证对几种常见的共模抑制方案进行了简单介绍与讨论，为共模抑制方面的研究工作提供参考。

参考文献

[1] 黄劲，熊蕊，王志，等．采用三相四桥臂抑制逆变器共模干扰的 SPWM 控制策略 [J]．电工技术学报，2009，24(3)：110-115．
Huang Jin, Xiong Rui, Wang Zhi, et al. SPWM control strategy to reduce inverter common-mode interferences based on three-phase four-leg structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 110-115.

[2] 姜艳姝，徐殿国，刘宇，等．PWM 驱动系统中感应电动机共模模型的研究 [J]．中国电机工程学报，2004，24(12)：149-155．

Jiang Yanshu, Xu Dianguo, Liu Yu, et al. Research on induction motor common-mode model in a PWM drive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 149-155.

[3] 姜艳姝．PWM 变频器输出共模电压抑制技术的研究 [D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2003．

[4] 章勇高，邝光健，龙立中．三相逆变器的无零矢量共模电压抑制技术研究 [J]．电力系统保护与控制，2013，41(2)：138-143．
Zhang Yonggao, Kuang Guangjian, Long Lizhong. Research of reduced common-mode voltage technique with nonzero vector pulse width modulation for three-phase inverters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 138-143.

[5] Giovanna Briti, Alexander E Julian, Thomas A lipo. A new space vector modulation strategy for cammon mode voltage reduction[C]. 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1997: 1541-1546.

[6] Emre Ün, Ahmet M Hava. A near-state PWM method with reduced switching losses and reduced common-mode voltage for three-phase voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 782-793.

[7] Tian Kai, Wang Jiacheng, Wu Bin, et al. A virtual space vector modulation technique for the reduction of common-mode voltages in both magnitude and third-order component[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 36(1): 839-848.

[8] Min Zhang, David J Atkinson, Bing Ji, et al. A near-state three-dimensional space vector modulation for a three-phase four-leg voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5715-5726.